



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## **PŘÍMÝ VSTŘÍK BENZÍNU – VSTŘIKOVACÍ SYSTÉM BUDOUCNOSTI?**

PETROL DIRECT INJECTION - INJECTION SYSTEM OF FUTURE?

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**LUKÁŠ SMILEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.**

BRNO 2008



## Anotace

Lukáš Smilek

Přímý vstřík benzínu – vstříkovací systém budoucnosti?

BP, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2009, str. 23, obr. 23, přílohy 0

Bakalářská práce se zabývá přímým vstříkem benzínu u spalovacích motorů. Uvádí přehled komponentů vstříkovacího systému. Popisuje jejich stavbu a princip funkce, výhody a nevýhody systému oproti starším způsobům vstříkování. Uvádí také přehled motorů s tímto způsobem vstříkování paliva.

## Klíčová slova

Spalovací motor, vysokotlaké čerpadlo, zásobník paliva, vysokotlaký vstříkovací ventil, vrstvené plnění, homogenní plnění

## Summary

Lukáš Smilek

Petrol Direct Injection - Injection System of Future?

BT, Institute of Automotive Engineering, 2009, p. 23, fig. 23, appendices 0

This thesis deals with petrol direct injection system in combustion engines. It introduces the key parts of injection system, describes the construction and function of each part, same as declares advantages and disadvantages in confrontation with older way of injection. This work introduces also summary of engines with the petrol direct injection system.

## Key words

Internal combustion engine, high pressure pump, fuel tank, high pressure injector, stratified-charging, homogeneous charging

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, na téma Přímý vstřik benzínu – vstřikovací systém budoucnosti, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Květen 2009

.....  
Lukáš Smilek

## Poděkování

Tímto děkuji Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D., za rady při tvorbě bakalářské práce.

# OBSAH

Úvodní list .....	1
Zadání závěrečné práce .....	3
Anotace .....	5
Prohlášení .....	7
Poděkování .....	9
Obsah .....	11
1 Úvod .....	12
2 Historie .....	13
2.1 Počátky vývoje zážehového spalovacího motoru .....	13
2.2 Jednotlivé generace vstřikovacího systému .....	13
2.2.1 Palivové soustavy s karburátorem .....	14
2.2.2 Palivové soustavy s nepřímým vstřikováním .....	15
2.2.3 Palivové soustavy s přímým vstřikováním .....	15
3 Princip činnosti vstřikovacího systému .....	15
3.1 Konstrukce systému .....	15
3.2 Princip činnosti .....	15
3.3 Částečné zatížení .....	16
3.4 Plné zatížení .....	17
3.5 Výhody a nevýhody systému .....	17
4 Konstrukce komponentů .....	18
4.1 Dopravní palivové čerpadlo .....	18
4.1.1 Elektrické válečkové čerpadlo .....	18
4.1.2 Vnitřní zubové čerpadlo .....	19
4.2 Vysokotlaké palivové čerpadlo .....	19
4.3 Zásobník paliva .....	21
4.4 Řídící ventil a snímač tlaku paliva .....	21
4.5 Vysokotlaké vstřikovací ventily .....	22
4.6 Elektronická řídící jednotka .....	22
4.7 Snímače systému .....	23
4.8 Katalyzátory systému .....	24
5 Přehled motorů s přímým vstřikem benzínu .....	25
5.1 Mitsubishi GDI .....	25
5.2 Volkswagen FSI .....	26
5.3 Toyota D-4 .....	26
5.4 BMW a Rolls-Royce .....	27
5.5 Ford SCi .....	28
6 Budoucnost vývoje .....	28
7 Závěr .....	29
Seznam použité literatury .....	30

# 1. Úvod

Jedny z prvních automobilů vznikaly už v 19. století. Lidé se jimi nejprve pokoušeli nahradit zvěř pracující na polích, ale ve 20. století zažil automobilismus prudký rozvoj až do dnešní podoby, kdy je automobil každodenní součástí našeho života. Nejdůležitější částí automobilu je pístový spalovací motor. Dosahuje nejlepšího poměru mezi využitím paliva a svou hmotností v porovnání s ostatními druhy motorů. Má také nižší hlučnost a nároky na údržbu. Vedle motorů spalujících alternativní paliva jsou nejrozšířenější právě motory získávající energii spalováním nafty nebo benzínu. Ty jsou ale méně šetrné k životnímu prostředí. S rostoucím počtem provozovaných automobilů se zvyšuje i škodlivý vliv spalin po shoření paliva. Je tedy nutné zpřísnovat emisní limity, jejichž splnění je čím dál technicky náročnější a dražší. Proto výrobci spalovací motory stále nutně vyvíjí.

Způsob přípravy směsi paliva se vzduchem je jedním z možných řešení jak optimalizovat parametry motoru. Zážehové motory prošly cestou od karburátoru přes vstřikování do sacího potrubí až k přímému vstřikování benzínu. Posledně zmiňované se objevilo už v roce 1937 u leteckých motorů a roku 1952 v prvních automobilech. Nese s sebou řadu výhod. Mezi hlavní patří možnost kvalitativní regulace výkonu a nižší spotřeba paliva. Ale i nevýhody, kvůli kterým narazil tento systém vstřikování paliva na omezení, jež v minulosti bránili jeho dalšímu rozšíření. S rozvojem elektroniky a výrobních možností je v dnešní době stále více prosazován.

V sériové výrobě jej jako první představila v roce 1996 automobilka Mitsubishi pod ochranou značkou GDI (Gasoline Direct Injection). Krok drželi i ostatní automobilky, například v roce 1999 to byl Volkswagen se svým systémem FSI. Toyota uvádí označení D-4, Alfa Romeo označení JTS (Jet Thrust Stoichiometric). Pod kapotou se objevili i u značek Ford nebo BMW.

## Audi 2.0 FSI

### Benzin-Direkteinspritzung

direct-injection petrol engine

08/01

#### Homogenbetrieb

Homogeneous operation



#### Schichtladebetrieb

Stratified-charge operation



Obr. 1.1 – Vstřikovací systém Volkswagen FSI [5]

## 2. Historie

### 2.1 Počátky vývoje zážehového spalovacího motoru

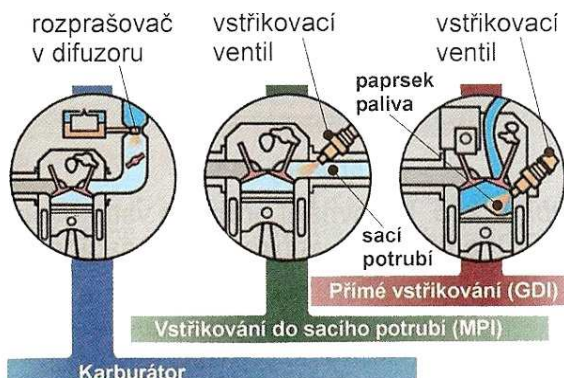
Vývoj pístových spalovacích motorů s vnitřním spalováním započal v 19. století Belgičan Jean Lenoir. Po konstrukci prvního stacionárního motoru spalující svítiplyn, získal Lenoir roku 1859 patent a vyrobil přes 500 exemplářů. Plány Lenoirova motoru odkoupil známý vynálezce Nikolaus Otto, s nímž v roce 1876 spojili síly Gottlieb Daimler a Wilhelm Maybach. Vyvinuli první čtyřdobý motor. Odtud známe pojem Ottův cyklus. Soud neuznal, aby patent německého inženýra pokryl všechny motory s vnitřní kompresí a tak se jeho poznatky staly volně dostupnými. Oproti parním strojům byl Ottův motor menší, tišší i účinnější, což byli nejlepší předpoklady k širokému rozvoji. Roku 1879 sestrojil samostatně pracující Karl Benz motor s vnitřním spalováním založený na stejné technologii jako Ottův, který poté použil při výrobě prvních automobilů. Od té doby prošli spalovací motory řadou inovací, týkajících se i přípravy palivové směsi. Systému přímého vstřikování benzínu se tak automobily dočkali v roce 1952. Prvními sériovými vozy byly Gutbrod Superior 600 a Goliath 700 GP. Vysoké náklady na provoz a výrobu vedly k finančně výhodnějším řešením tvorby směsi. V dnešní době tato technologie zažívá své znovuzrození.



Obr. 2.1 – Jednoválcový benzínový motor (1910) [6]

### 2.2 Jednotlivé generace vstřikovacího systému

Při provozu zážehového motoru je nutné připravit směs vzduchu a paliva. Ta je tvořena buď mimo válec motoru nebo přímo ve válci. Ideální poměr vzduchu a paliva je 14,8:1, kdy dochází teoreticky k úplnému spalování směsi. Tento poměr je označován jako stechiometrický.



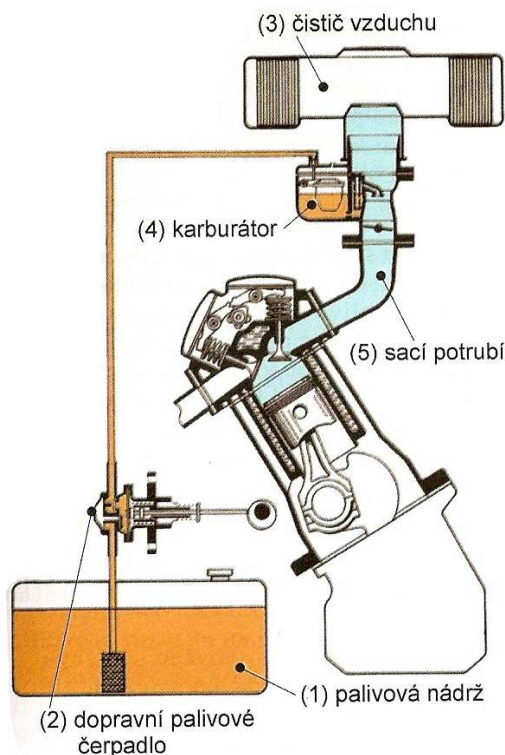
Obr. 2.2 – Způsoby přípravy směsi [1]

Reálně je ale zapotřebí přebytek vzduchu a navíc určité provozní podmínky vyžadují korekci složení směsi. Tato korekce je realizována právě prostřednictvím palivové soustavy.



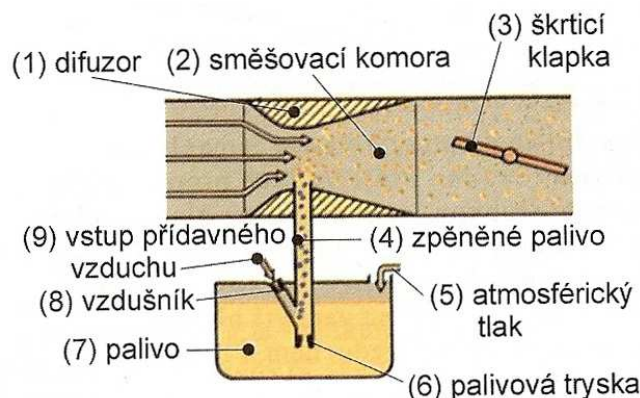
### 2.2.1 Palivové soustavy s karburátorem

U karburátorové soustavy je palivo z nádrže (1) hnáno membránovým čerpadlem (2) do komory karburátoru (4). Skrz čistič vzduchu (3) je nasáván vzduch, který se v karburátoru mísí s palivem. Vzniká zápalná směs proudící dál sacím potrubím (5) přes škrtkovací klapku a dále do válců motoru. Škrtkovací klapka dovoluje pouze kvantitativní regulaci výkonu motoru.



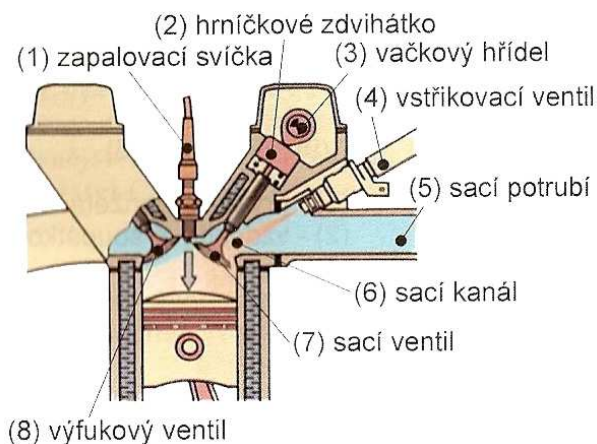
Obr. 2.2.1.1 – Palivová soustava s karburátorem [1]

Při průchodu vzduchu zúženým průřezem difuzoru (1) vzniká podtlak, kterým je nasáváno zpěněné palivo (4) z plovákové komory karburátoru. Zpěněním paliva přídavným vzduchem (9) docílíme jemnějšího rozprášení paliva ve směšovací komoře (2). Tam se zpěněné palivo mísí se vzduchem.



Obr. 2.2.1.2 – Schéma principu činnosti karburátoru [1]

## 2.2.2 Palivové soustavy s nepřímým vstřikováním



Obr. 2.2.2 – Vícebodové nepřímé vstřikování benzínu [1]

U tohoto způsobu přípravy směsi se palivo rovněž mísí se vzduchem mimo válec motoru. Je zde vstřikováno do sacího potrubí (5) nebo přímo do sacího kanálu (6). Podle počtu vstřikovacích ventilů (4) rozlišujeme jednobodové (SPI – single point injection) a vícebodové vstřikování (MPI – multiple point injection). Po otevření sacího ventilu (7) je do motoru nasávána již předmísená směs a při kompresním zdvihu dochází ve válci k vytvoření zápalné směsi.

Výhodou této palivové soustavy je lepší plnění válců oproti karburátoru, kde škrcením ztrácí nasávaný vzduch svou kinetickou energii. Motor má také rychlejší reakci na změnu natočení škrtící klapky a je možné přesnější řízení dávky paliva.

## 2.2.3 Palivové soustavy s přímým vstřikováním

Poslední generace palivové soustavy dovoluje velmi přesné dávkování paliva a je tak z hlediska řízení směšovacího poměru nejvýhodnějším řešením. Palivo se zde mísí se vzduchem přímo ve válcích motoru. Přímý vstřik benzínu je podrobněji popsán v dalších kapitolách.

## 3 Princip činnosti vstřikovacího systému

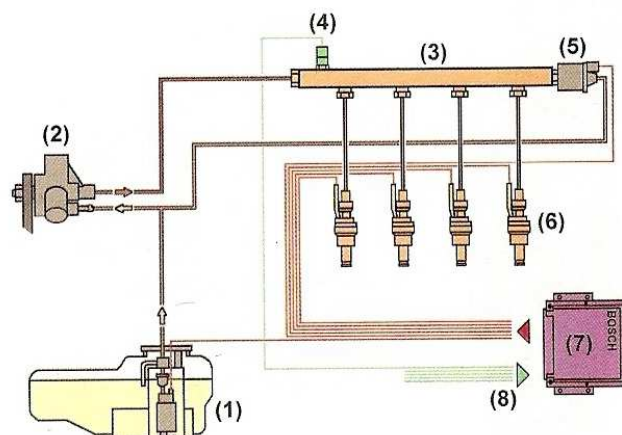
### 3.1 Konstrukce systému

Pokud je to možné, volí jednotliví výrobci motorů a příslušenství z důvodu patentových ochrán svou původní koncepci. Systémy přímého vstřiku paliva se tak v některých konstrukčních řešeních liší. Základem ale vždy zůstává vysokotlaké palivové čerpadlo, zásobník paliva (rozdělovací palivové potrubí), vstřikovací ventily, snímače a řídicí ventil tlaku paliva.

### 3.2 Princip činnosti

Nízkotlakým čerpadlem (1) v nádrži je palivo vytlačováno přes palivový filtr do vysokotlakého čerpadla (2). V tomto vysokotlakém čerpadle dosahuje palivo přetlaku přibližně 5 MPa a putuje dál do rozdělovacího potrubí (3), které

slouží jako zásobník tlaku a zároveň rozvádí palivo do jednotlivých vysokotlakých vstřikovacích ventilů (6). Elektronická řídicí jednotka (7) přitom získává okamžité hodnoty ze snímače tlaku paliva (4) a nastavuje požadovaný tlak paliva skrze řídicí ventil (5). Elektromagneticky ovládané vysokotlaké vstřikovací ventily (6) dávkuje palivo v přesném množství přímo do válců motoru. Mezi snímače systému (8) řadíme např. snímač polohy a otáček vačkového hřídele, klikového hřídele, snímač teploty chladicí kapaliny, teploty výfukových plynů nebo snímač podtlaku v sacím potrubí.



Obr. 3.2 – Schéma palivového systému s přímým vstřikováním [1]

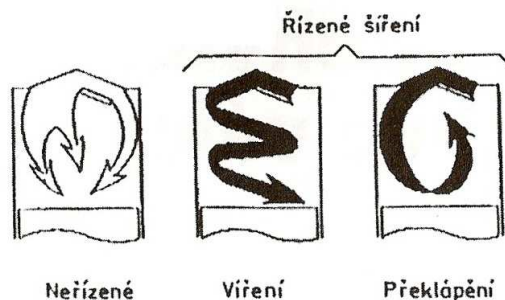
- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| (1) – nízkotlaké palivové čerpadlo v nádrži | (5) – řídicí ventil tlaku paliva      |
| (2) – vysokotlaké palivové čerpadlo         | (6) – vysokotlaké vstřikovací ventily |
| (3) – rozdělovací palivové potrubí          | (7) – elektronická řídicí jednotka    |
| (4) – snímač tlaku paliva                   | (8) – snímače systému                 |

Nízké spotřeby dosáhneme, pokud bude motor spalovat velmi chudou směs. To ale při plném zatížení není možné, klesá tak i celkový výkon. Z tohoto důvodu se u přímého vstřikování rozlišují dva režimy tvorby zápalné směsi.

### 3.3 Částečné zatížení

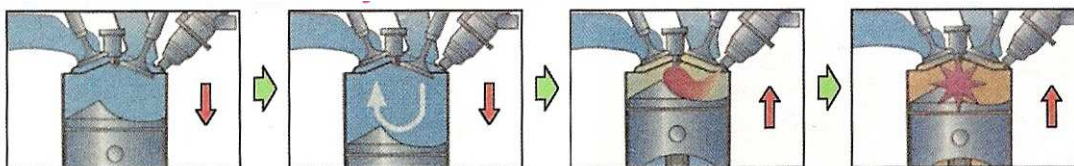
Jedná se o úsporný režim, při kterém není zapotřebí plného výkonu motoru. V tomto případě lze použít chudou zápalnou směs a využívá se i vysokého procenta recirkulovaných výfukových plynů. Sníží se tak spalovací teplota a tvorba oxidů dusíku. Čím je ale směs chudší, tím obtížněji se zážehem zapálí. Proto se při spalování klade velký důraz na dokonalé rozvrstvení směsi ve válcích tak, aby v okolí zapalovací svíčky byla směs stechiometrická, zatímco zbytek spalovacího prostoru bude vyplněn chudou směsí nebo případně jen čistým vzduchem. Jedná se o tzv. vrstvené plnění.

Správného rozvrstvení se dosahuje usměrněním proudu nasávaného vzduchu, čemuž napomáhá optimální tvar pístu a sacího potrubí. Do takto usměrněného vzduchu se provádí vstřik paliva na konci kompresního zdvihu těsně před zažehnutím jiskry, kdy je ve válci již značně vysoký tlak. Paprsek vstřikovaného paliva je tvarem pístu nasměřován ke svíčce a díky



Obr. 3.3.1 – Řízení proudu vzduchu [1]

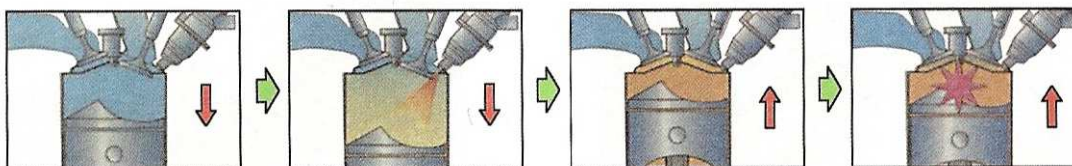
vysokému tlaku ve spalovacím prostoru se udrží pohromadě a je tak možné zapálit i velmi chudou směs.



Obr. 3.3 – Částečné zatížení (úsporný režim s velmi chudou směsí) [1]

### 3.4 Plné zatížení

Při práci motoru ve vysokých otáčkách nebo za plného zatížení je třeba připravit v celém objemu spalovacího prostoru zápalnou směs odpovídající ideálně stechiometrickému složení, tj. režim s homogenní směsí. K recirkulaci výfukových plynů zde nedochází. Množství nasávaného vzduchu je přitom řízeno natočením škrtkové klapky (kvantitativní regulace). Palivo se vstřikuje v době sání a v průběhu kompresního zdvihu vytváří píst homogenní zápalnou směs. Výhodou je pak menší náchylnost k detonačnímu klepání motoru. Přechod mezi oběma režimy je plynulý díky „polovrstvenému režimu,“ kdy se palivo vstřikuje dvoufázově. Tedy nejprve malé množství benzínu při sání, druhá dávka na konci kompresního zdvihu. Předchází se tak klepání motoru a přechod mezi režimy je plynulý, pro řidiče nepostřehnutelný.



Obr. 3.4 – Plné zatížení (vysoký výkon, stechiometrické složení směsi) [1]

### 3.5 Výhody a nevýhody systému

Při nepřímého vstřikování paliva do sání se část směsi usazuje na stěnách potrubí, především při studeném startu a zahřívání motoru. Proto musí být vstřikované množství paliva vyšší, zvyšuje se i spotřeba a emise motoru. To u přímého vstřiku odpadá, obohacení zde není potřeba. U zážehových motorů s přímým vstřikováním také odpadá škrcení nasávaného vzduchu, což představuje energetickou ztrátu. Hlavní výhodou ale zůstává možnost úsporného režimu motoru, kdy se pohybuje snížení spotřeby paliva v evropských podmínkách mezi 15% až 20%. Tomu napomáhá kvalitativní řízení výkonu, kdy se k řízení výkonu využívá správného dávkování paliva. Složení zápalné směsi je tak proměnlivé v závislosti na provozní stav motoru. Při vstříknutí se benzín ve spalovacím prostoru odpaří, přičemž odebírá teplo a napomáhá tak chlazení a zlepšuje stupeň plnění. To vede k lepší tepelné účinnosti a vyšší celkové účinnosti motoru. Přímý vstřík ve spojení se spalováním chudé směsi však není tak jednoduchou záležitostí, jak se může zdát.

Potřeba jemného rozprašení paliva klade vysoké nároky na tlak paliva, tvarovaný paprsek paliva při vstřiku ale i přesné řízení pohybu nasátého

vzduchu ve válci motoru. Vzhledem k vysokým otáčkám zážehových motorů je také třeba připravit přesnou dávku paliva v daleko kratším čase. U homogenního plnění přímý vstřík do válce motoru zvyšuje nepatrně křivku krouticího momentu, ale tvarování pístu tomu zase brání, takže se tato výhoda oproti starším vytrácí. Kvůli vyššímu kompresnímu poměru a režimu spalování chudé směsi roste i náročnost na oktanové číslo, aby se předešlo detonačnímu spalování. Čidlo klepání tomuto jevu do značné míry předchází, pak lze použít i palivo Natural 95. Bohužel i tak dojde u některých motorů k vyšší spotřebě, nepatrně hlučnějšímu chodu a menší pružnosti v nízkých otáčkách (v porovnání s palivem s oktanovým číslem 98). Další nevýhodou je splnění emisních limitů. Při spalování chudé směsi vzniká daleko více škodlivých látek, hlavně oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ . Proto je u těchto motorů nutné použít složitější katalyzátory, tak roste i výrobní cena automobilů. Například dvoustupňový katalyzátor a pohlcovač částic  $\text{NO}_x$ , dvě vyhřívané kyslíkové sondy a systém recirkulace výfukových plynů. Díky využití takovýchto zachytných systémů splňují motory s přímým vstřikem normu Euro 4.

Automobilka Volkswagen tento problém lidově řečeno obešla, když uvedla motory spalující jen homogenní směs. Například motory 1,6 FSI ve škodě Octavia nepracují s vrstveným plněním, ale pouze s homogenní směsí. Díky tomu se sníží náklady o drahou elektroniku a zásobníkový katalyzátor oxidu dusíku, ale tyto motory tedy nevyužívají všech možností, které technologie FSI přináší. Oproti nepřímému vstřikování však nabízí menší náchylnost ke klepání vlivem detonačního spalování a ochlazování válce vstřikovaným palivem. Ve výsledku se zvyšuje kompresní poměr (oproti 10:1 je to 12:1 např. u motoru 1,6 FSI).

## **4 Konstrukce komponentů**

### **4.1 Dopravní palivové čerpadlo**

Úkolem dopravního čerpadla je dodávat z palivové nádrže skrze čistič dostatek paliva vysokotlakému palivovému čerpadlu. K tomuto účelu vystačí přetlak 0,3 bar až 1 bar. Můžeme se setkat i s názvem „mokrý“ čerpadlo, protože proud benzínu prochází skrze čerpadlo a spolehlivě jej ochlazuje. Z hlediska bezpečnosti zde nehrozí žádný problém z důvodu absence vzdušného kyslíku. Z hlediska konstrukce můžou být zhotovena buď odstředivá nebo objemová čerpadla.

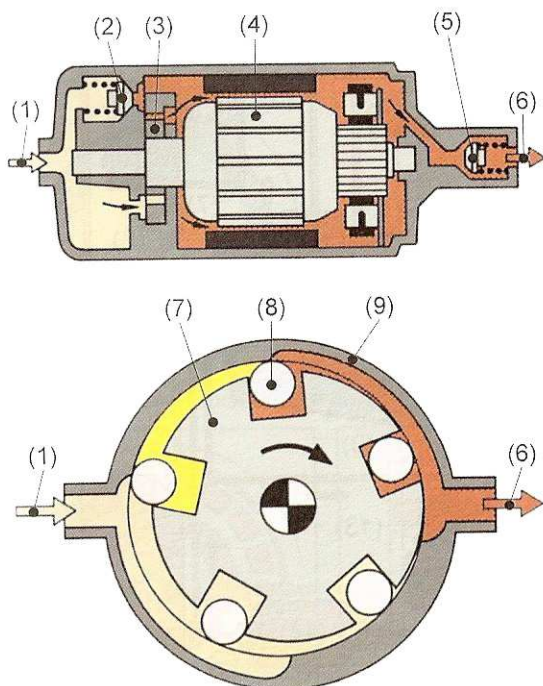
#### **4.1.1 Elektrické válečkové čerpadlo**

Z odstředivých je nejčastěji použito válečkové čerpadlo (3) poháněné elektromotorem (4) napájeným stejnosměrným proudem. Ve skříni čerpadla (9) se nachází vystředěný rotor čerpadla (7) opatřený drážkami. V těchto drážkách jsou umístěny válečky (8), které jsou následkem otáčení rotoru přitlačovány odstředivou silou ke stěně skříně (9). Palivo je nasáváno (1) přes pojistný ventil (2) a dopravováno v dutinách s válečky k výtlačné straně čerpadla (6).

Jako objemové čerpadlo se používá mechanicky poháněné zubové čerpadlo. To bývá umístěno buď na motoru, kde využívá vlastního pohonu, nebo přímo ve vysokotlakém čerpadle, se kterým pohon sdílí. Množství



dopravovaného paliva je řízeno škrcením na vstupní straně čerpadla, nebo přepouštěním paliva na výstupní straně.

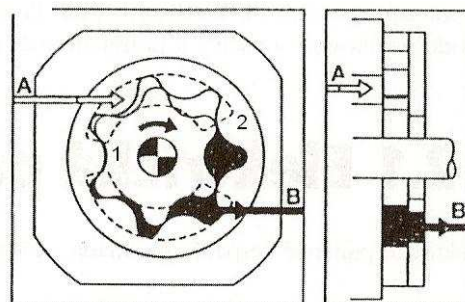


Obr. 4.1.1 – Elektrické válečkové čerpadlo [1]

- (1) – sací strana
- (2) – pojistný ventil
- (3) – válečkové čerpadlo
- (4) – rotor elektromotoru
- (5) – výtlačná strana
- (6) – kotouč
- (7) – váleček
- (8) – skříň

#### 4.1.2 Zubové čerpadlo s vnitřním ozubením

Tento typ čerpadel postačuje u přetlaků do 0,4 MPa. Skládá se z vnitřního poháněného kola (1), které svými zuby zapadá do vystředěného vnějšího kola (2), které má o jeden zub více. Otáčením obou kol se mění objem komor mezi zuby, vzniká tak podtlak při nasávání (A) a přetlak při výtlačku (B) paliva.

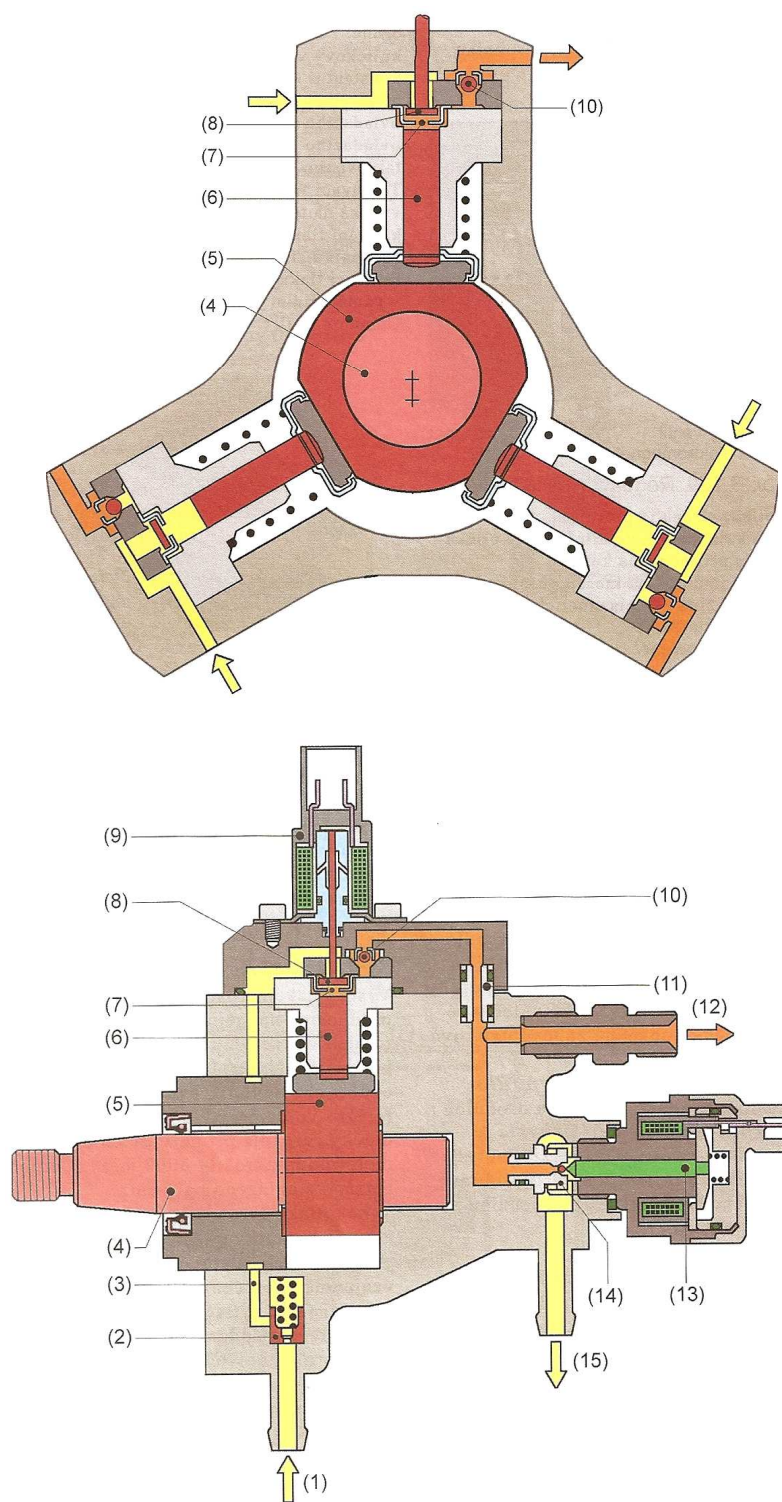


Obr. 4.1.2 – Vnitřní zubové čerpadlo [2]

#### 4.2 Vysokotlaké palivové čerpadlo

Účelem vysokotlakého palivového čerpadla je dodávat za všech provozních podmínek palivo o tlaku až 12 MPa, potřebném ke vstřikování, do zásobníku paliva (rozdělovacího potrubí). Tento tlak je vyvozen posouváním pístků ve válcích čerpadla, které se používají u systému přímého vstřiku benzínu mechanicky poháněná a to buď od klikového nebo vačkového hřídele motoru. Při provozu čerpadla musí být také zabráněno smíchání motorového oleje s benzinem. Posuv pístů může být vzhledem k ose čerpadla axiální nebo radiální.

U radiálních čerpadel jsou písty ovládány v radiálním směru k ose čerpadla výstředníkem, poháněným hnacím hřídelem. Jak se písty pohybují, mění objem svého válce. Dochází k nasávání při zvětšování a výtlačku při zmenšování objemu. I u zde se využívá více článků píst – válec k dosažení rovnoměrnějšího tlaku. Optimálním počtem jsou tři články. Další možnosti, jak zamezit nadměrnému kolísání tlaku, je použití profilovaného výstředníku, který provede během jedné otáčky hřídele více zdvihů pístu jednotky čerpadla.



Obr. 4.2.2 – Vysokotlaké palivové čerpadlo Bosch, příčný a podélný řez [1]

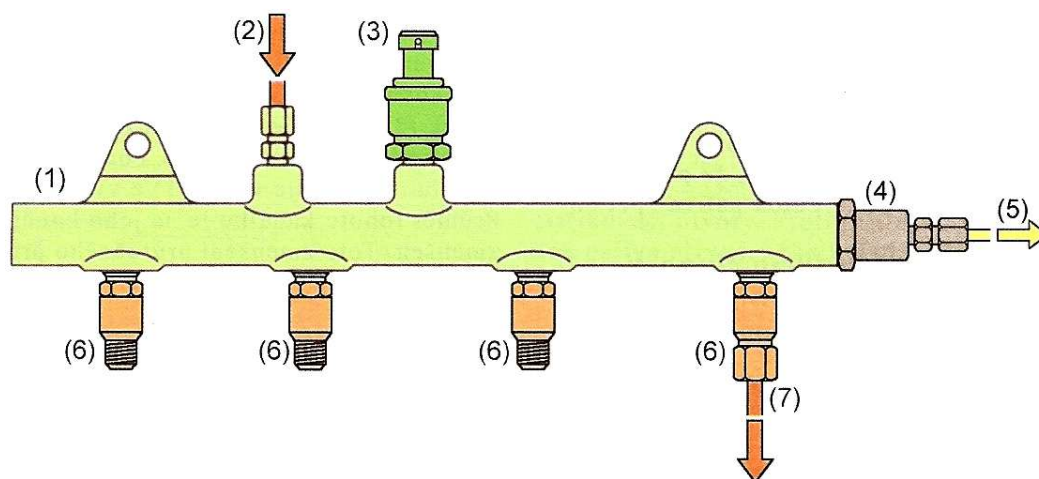
- |  |   |
|--|---|
| (1) – přívod paliva                      | (9) – odpojovací ventil jednotky čerpadla                         |
| (2) – pojistný ventil                    | (10) – výtlačný ventil  |
| (3) – nízkotlaký kanál                   | (11) – těsnící vložka   |
| (4) – hnací hřídel                       | (12) – vysokotlaká přípojka k zásobníku paliva (rozvaděči paliva) |
| (5) – výstředníková vačka                | (13) – regulátor tlaku paliva                                     |
| (6) – píst jednotky čerpadla             | (14) – kuličkový ventil   |
| (7) – prostor ve válci jednotky čerpadla | (15) – zpětný odvod paliva  |
| (8) – sací ventil                        |   |

Dopravní čerpadlo palivové soustavy přivádí palivo (1) k pojistnému ventilu (2). Ten se při určitém „podávacím“ tlaku otevře. Od motoru poháněný hnací hřídel (4) roztáčí výstředníkovou vačku (5). Písty čerpadla (6) při pohybu opisují profil vačky (5) pomocí dosedacích zdvihátek a vratný pohyb způsobí síla pružin. Palivo je vytlačováno skrz nízkotlaký kanál (3) k sacímu ventilu (8). Ve válci, ve kterém se píst pohybuje k dolní úvratí, vzniká podtlak a palivo je nasáto do prostoru válce čerpadla (6). Při výtlačném pohybu se je sací ventil (8) uzavřen a palivo odchází skrze výtlačný ventil (10) do zásobníku paliva (12).

V případě, že vysokotlaké čerpadlo dodává nadměrné množství paliva, odpojí se pístová jednotka čerpadla. Tak se sníží dopravované množství a odstraní se ztráty energie získané stlačením a následným propuštěním tlaku skrze regulátor (13). Jednotka se odstaví v případě, že je sací ventil (8) trvale držen otevřený pomocí elektromagnetu (9). Palivo se tak při výtlačku vrací zpět do nízkotlakého kanálu (3).

### 4.3 Zásobník paliva

Vysokotlaký zásobník paliva slouží jako akumulátor tlaku paliva a zároveň jako rozdělovací potrubí k jednotlivým vstřikovacím ventilům. Zásobník musí být dostatečně pružný, aby byl schopný tlumit tlakové pulsace způsobené jednotlivými vstřiky paliva a pracovními pohyby čerpadla, ale zároveň také natolik tuhý, aby mohl být tlak paliva rychle přizpůsoben požadavkům motoru. Pružnost zásobníku je odvozena z objemu a stlačitelnosti akumulovaného paliva. Součástí rozdělovacího potrubí je i snímač tlaku a řídicí ventil. Vyrábí se z hliníkové slitiny.



Obr. 4.3 – Zásobník paliva [1]

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| (1) – vysokotlaký zásobník             | (5) – zpětný odvod paliva    |
| (2) – přívod od vysokotlakého čerpadla | (6) – potrubí ke vstřikovači |
| (3) – snímač tlaku paliva              | (7) – dávkování paliva       |
| (4) – řídicí ventil                    | vstřikovačem                 |

### 4.4 Řídicí ventil a snímač tlaku paliva

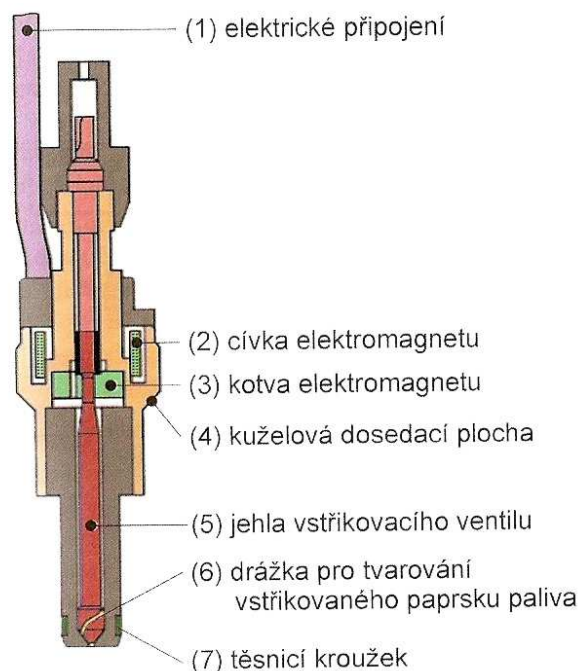
Aby dodávalo vysokotlaké čerpadlo do systému dostatečné množství paliva za všech provozních podmínkách, je poměrně hodně dimenzováno.



Snímač tlaku paliva proto měří hodnotu tlaku v zásobníku. Jedná se o kovovou nerezovou membránu, na které jsou nanесeny měřicí rezistory. Naměřené hodnoty poté předává elektronické řídicí jednotce. Hodnoty systémového tlaku paliva musí odpovídat předepsaným a v paměti řídicí jednotky uloženým hodnotám. Řídicí jednotka podle těchto hodnot třírozměrného datového pole rozhoduje, jaký tlak nastaví řídicí ventil v zásobníku paliva. Nadbytečné množství řídicí ventil přepustí zpět na sací stranu vysokotlakého čerpadla. Toto množství je závislé na provozním stavu motoru.

#### 4.5 Vysokotlaké vstřikovací ventily

Elektromagneticky řízené vstřikovací ventily jsou připojeny přímo na zásobník paliva a slouží ke vstřiku přesné dávky paliva do válců motoru, přičemž každému válci náleží vlastní ventil. V klidovém (uzavřeném) stavu tlačí pružina jehlu do sedla ventilu, čímž zamezí průtoku paliva. V určitém okamžiku vyšle řídicí jednotka napěťový signál do cívky elektromagnetu (2). Určí tak počátek a dobu otevření vstřikovacího ventilu. Kolem jehly (6) začne pod tlakem ze zásobníku proudit palivo, jehož směr je řízen tvarem jehly vstřikovače. Tvar jehly umožňuje vytvořit při vstřiku rotující kužel jemně rozprášeného paliva. To se tak velmi dobře promísí s nasávaným vzduchem.



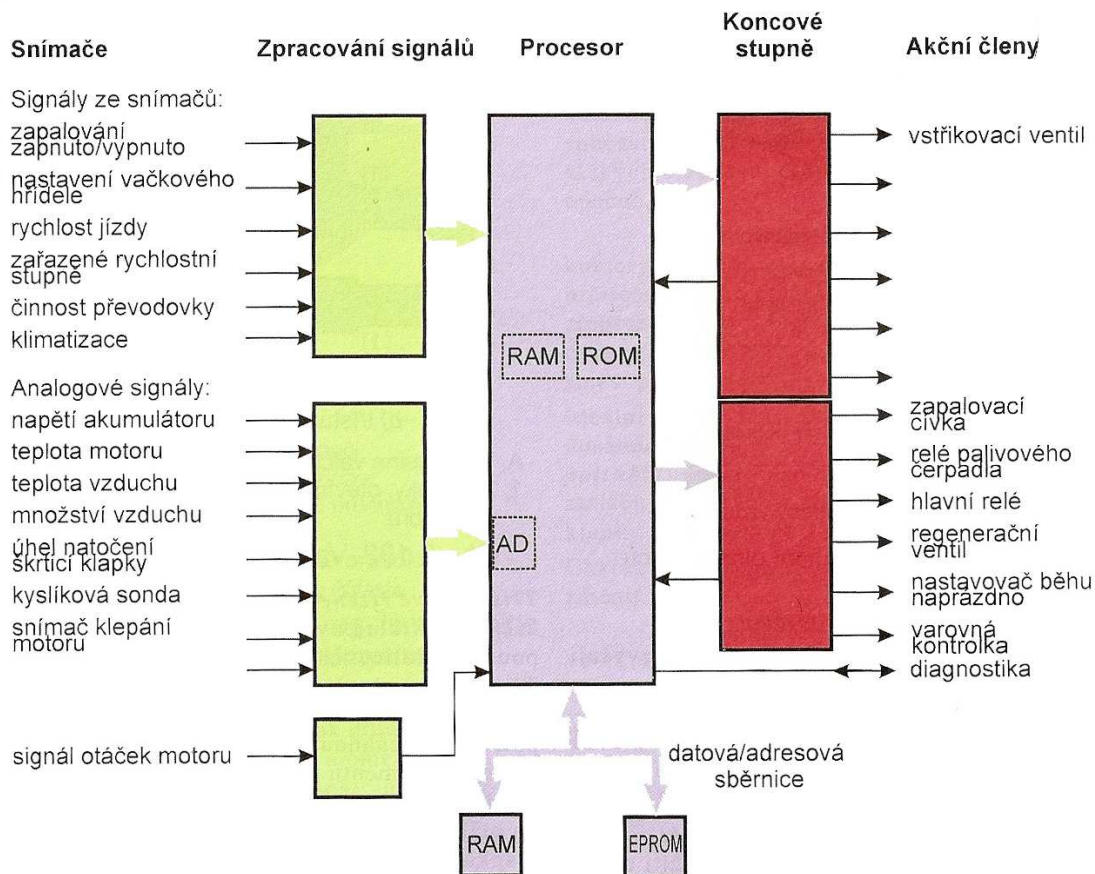
Obr. 4.5.1 – Vysokotlaký vstřikovací ventil [1]

Novějším typem jsou piezoelektrické vstřikovací ventily. Základní pracovní prvek zde tvoří pravidelná krystalová mřížka kladně a záporně nabitými ionty. Pokud je na tuto mřížku přiveden elektrický proud, velmi rychle se zdeformuje. Této deformace se využívá k pohybu jehly ve vstřikovací trysce. Aby tento prvek odolal tepelným podmínkám ve spalovacích motorech, je vyráběn z keramického materiálu s přídavkem oxidu olovnatého nebo zirkoničitého.

#### 4.6 Elektronická řídicí jednotka

Provozní stav palivové soustavy s přímým vstřikováním zahrnuje celou řadu požadavků a podmínek. Řídicí systém tak musí za provozu koordinovat velké množství proměnných řídicích veličin. Nejdůležitější požadavkem je točivý moment. Ten vzniká sešlápnutím akceleračního pedálu, ale je kontrolován i regulací zabraňující proklutu kol nebo regulací jízdní dynamiky. Řídicí jednotka také nutně hlídá hmotnost nasávaného vzduchu pomocí škrtící klapky, složení směsi pomocí kyslíkových sond, recirkulaci výfukových plynů, apod.

Elektronickou řídící jednotku tvoří řídící deska s řadou mikroprocesorů v kovovém pouzdře. Jedná se o „výpočetní a řídící středisko“ celého systému. Skrze snímače dostává informace, které následně zpracovává za pomoci funkcí a algoritmů uložených v paměti. Výstupní řídící signály pak vysílá všem ovládacím členům kontrolovaných prvků automobilu.



Obr. 4.6 – Blokové schéma řídicího systému [1]

## 4.7 Snímače systému

Funkcí snímačů je převod fyzikálních a chemických veličin, jako jsou teplota, rychlost, tlak, koncentrace kyslíku ve spalínách atd., na elektrické signály. Aby mohly být tyto signály v řídící jednotce zpracovány, upravují se v tzv. přizpůsobovacím obvodu. Úpravy nebo nedokonalé opravy kabeláže bývají příčinou těžce odhalitelných závad.

U snímačů teploty se využívá jevu změny elektrického odporu se změnou teploty. Podávají informace o teplotách chladicí směsi, plnicího vzduchu v sání, motorového oleje a paliva.

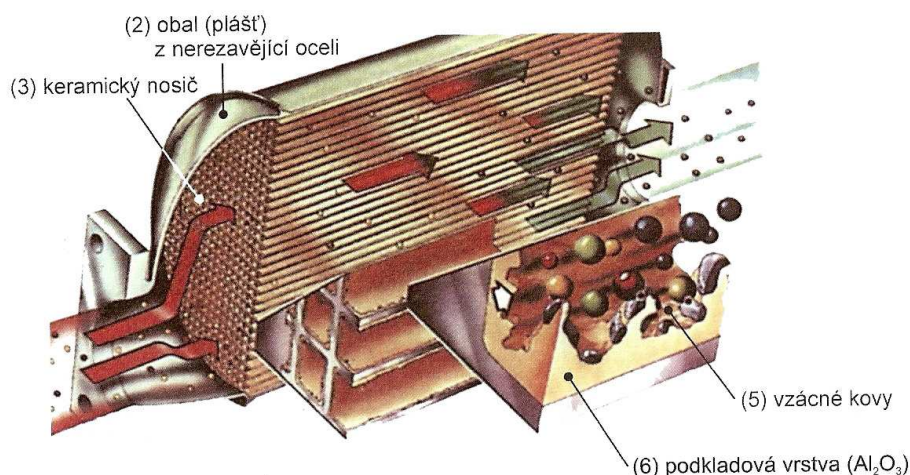
Indukční snímač umístěný na klikovém hřídeli stanovuje jeho polohu k určení otáček a počátku vstřiku paliva. Snímač polohy vačkového hřídele zase zjišťuje zda se píst při startu motoru nachází v kompresním nebo výfukovém zdvihu.

Pro udržení správného směšovacího poměru je třeba znát množství nasávaného vzduchu. Tuto hodnotu nám poskytuje snímač umístěný v sacím potrubí. Ve výfukovém potrubí je to kyslíková „lambda“ sonda, která měří množství kyslíku ve výfukových plynech.

Dalšími snímači palivové soustavy jsou např. snímač klepání motoru nebo snímač podtlaku v sacím potrubí.

#### 4.8 Katalyzátory systému

Při spalování chudé směsi jsou podstatně výraznějším problémem emise, především vysoká míra oxidů dusíku ve spalínách. Dusík a kyslík vytváří za vysokých teplot a tlaků při spalování oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ). Tento plyn se poté slučuje se vzdušným kyslíkem a vzniká ostře jedovatý oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ), který napadá plíce lidského organismu. Zpětná vedení výfukových plynů nejsou dostatečným opatřením. Proto musí obsahovat palivové soustavy pracující v úsporném režimu důmyslnější katalyzátory.



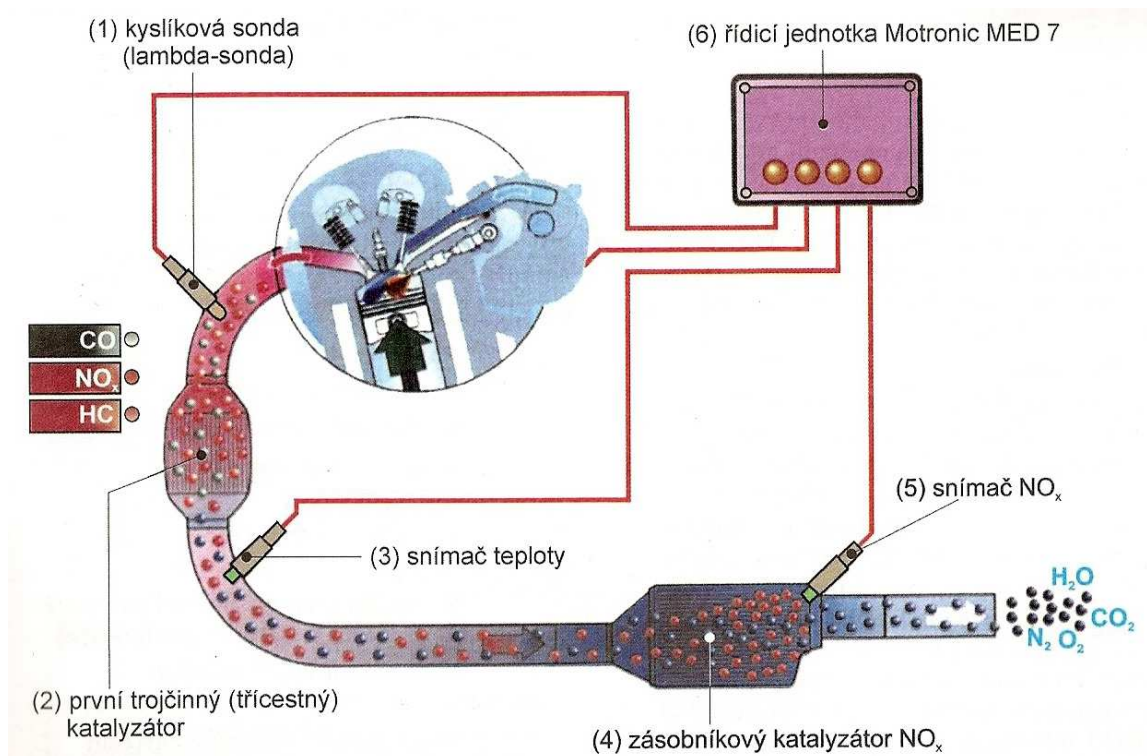
Obr. 4.8.1 – Schématický řez katalyzátorem [1]

Katalyzátor přeměňuje škodliviny  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  a  $\text{NO}_x$  na  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2$  účinně jen v úzkém rozsahu složení směsi. Zde se využívá lambda regulace, dnes převážně se dvěma kyslíkovými sondami. Další dodatečné zpracování oxidů dusíku se provádí v zásobníkovém (absorpčním) katalyzátoru.

Tento katalyzátor váže  $\text{NO}_x$  pomocí absorpčního materiálu ve formě pevných dusičnanů. Protože má ale určitou kapacitu, při vrstveném spalování je „plný“ přibližně za minutu provozu. Poté musí řídicí jednotka krátkodobě obohatit zápalnou směs, aby se po jejím shoření dostaly do absorpčního katalyzátoru oxid uhelnatý spolu s nespálenými uhlovodíky, kde působí jako redukční prostředek. Rozloží absorbované dusičnany zpět na  $\text{NO}_x$  a ty reagují s  $\text{HC}$  a  $\text{CO}$  jako v případě trojčinných katalyzátorů.

Bohužel se kvůli nutnému obohacování směsi zvyšuje celková spotřeba motoru. Navíc je tento katalyzátor velmi citlivý na síru, která jej zanáší. I řízení motoru je náročnější z hlediska častých přechodů z chudé na bohatou směs.





Obr. 4.8.2 – Úprava výfukových plynů s řízením motoru Bosch Motronic MED 7[1]

## 5 Přehled motorů s přímým vstřikem benzínu

### 5.1 Mitsubishi GDI

Automobilka Mitsubishi vyvíjela soustavu s přímým vstřikováním s označením GDI (Gasoline Direct Injection) celých patnáct let. Za tuto dobu firma uplatnila asi 200 patentovaných konstrukčních řešení a prvků. První motor s tímto systémem uvedla do sériové výroby v automobilu Mitsubishi Galant a jednalo se o řadový čtyřválec 1.8 GDI. Hlavní odlišností od konkurenčních řešení jsou svislé sací kanály, které společně s tvarovaným dnem pístu zajišťují optimální plnění válců. Proud vzduchu při sacím zdvihu směřuje rovnoběžně s osou. Palivo je vstřikováno pod tlakem až 5 MPa.

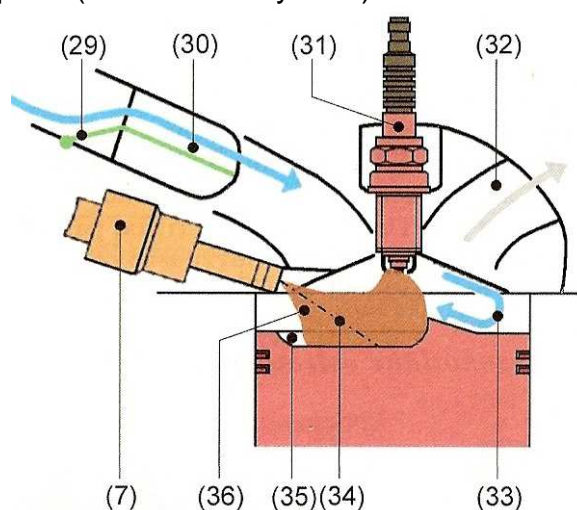


Obr. 5.1 – Přímé vstřikování GDI [1] a speciální konstrukce pístu GDI [10]

V motorech GDI je jako přídavný katalyzátor použit selektivně redukční katalyzátor. Ten sice nedosahuje tak vysoké úrovně čištění výfukových plynů, pracuje však trvale i v úsporném režimu. Nese označení DeNO<sub>x</sub> a principem je aktivní katalytická vrstva iridia. Iridium pracuje s vyšší účinností než používané rhodium v klasických trojcestných katalyzátorech, ale pouze v úzkém pásmu teplot.

## 5.2 Volkswagen FSI

Dnes asi nejznámější systém představil koncern Volkswagen, který úzce spolupracuje s firmou Bosch. Právě firmou Bosch je vyvíjen a vyráběn systém řízení motoru a vstřikovací zařízení s označením Motronic MED 7. V úsporném režimu dochází k velkému přebytku vzduchu (vrstvené plnění). To je, na rozdíl od svislých kanálů automobilky Mitshubishi, zajištěno sacími kanály s nastavitelnou klapkou (tzv. Tumble systém).



Obr. 5.2 – Režim s vrstvenou směsí u motorů VW FSI [1]

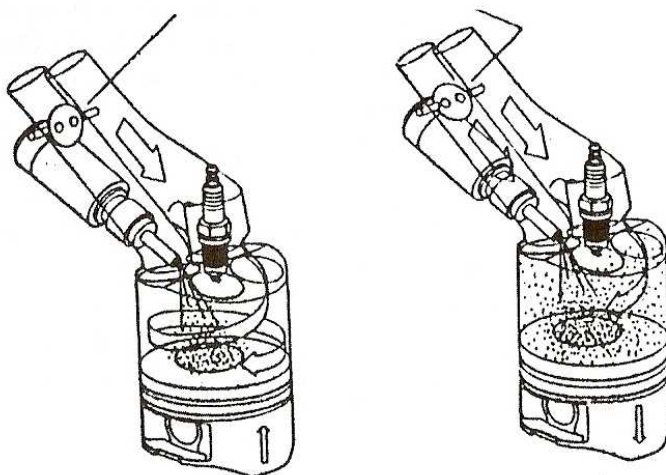
- |                                      |                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| (7) – vysokotlaký vstřikovací ventil | (33) – Tumble proudění          |
| (29) – Tumble – klapka               | (34) – šikmá osa paprsku paliva |
| (30) – sací kanál                    | (35) – vybrání pístu            |
| (31) – zapalovací svíčka             | (36) – vstřikovací paprsek      |
| (32) – výfuk                         |                                 |

Při částečném zatížení je tato klapka (29) uzavřena a umožňuje tak průtok vzduchu pouze horní částí sacího kanálu (30). Tím je ve válci vyvolán silný válcovitý vír vzduchu (33). V případě plného zatížení se klapka otevře a vzduch je nasáván celým průřezem kanálů (viz též obr. 1.1). Palivo je poté, v závislosti na otáčkách, vstřikováno pod tlakem 5 až 12 MPa.

## 5.3 Toyota D-4

Toyota využila přímého vstřikování benzínu u svých motoru s označením D-4. Od konkurenčních řešení se liší hlavně ve vedení nasávaného vzduchu. Vrstveného plnění se dosahuje vířivým prouděním ve válcích motoru. Pomocí škrtkové klapky je uzavřen jeden sací kanál a vzdušný vír tak probíhá podél stěny válce. Vstříknutá směs je takto ve vyhloubení dna pístu nejméně ochuzena a lépe zapalitelná. Navíc se v blízkosti stěn drží obvykle pouze vzduch

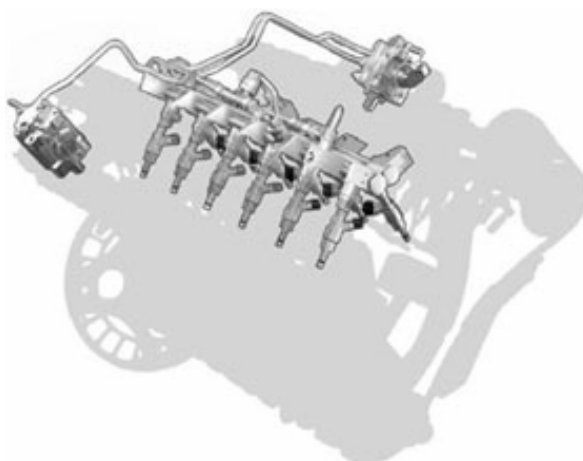
s recyklovanými výfukovými plyny, což funguje i jako tepelná izolace a zvyšuje se tak tepelná účinnost motoru. Pokud je zapotřebí plného výkonu motoru, řídicí systém přejde do režimu homogenního plnění a otevře škrtkovací klapku. Vzduch je nasáván oběma kanály a víření je utlumeno.



Obr. 5.3 – Řízení vzdušného proudění škrtkovací klapkou víření (Toyota D-4) [2]

#### 5.4 BMW a Rolls-Royce

U BMW se přímý vstřik objevil poprvé u 12-ti válců N73 s objemem 6 litrů. Palivovou soustavu vyvíjela automobilka také ve spolupráci s firmou Bosch. Spolu s variabilním časováním ventilů a variabilním zdvihem sacího ventilu tyto motory dosahují výkonu 338 kW při 6000 min<sup>-1</sup> a maximálního točivého momentu 720 Nm při 3500 ot/min. Motor N73 konstruktéři přizpůsobili požadavkům na vysoký točivý moment od nejnižších otáček, protože je použit i ve vozech značky Rolls-Royce. U posledních motorů M73B54 např. v modelu Silver Seraph zákazníkům totiž nevyhovovala právě slabá výkonová charakteristika.



Obr. 5.4 – Systém přímého vstřikování motoru N73 [9]

## 5.5 Ford SCi

Ford použil přímé vstřikování benzínu poprvé v motorech 1,8 SCi (Smart Charge Injection ) ve vozech Mondeo. Systém zde pracuje podobně jako u motorů D-4, kdy se při vrstveném plnění otevírá pouze jeden ze dvou sacích kanálů. Pro srovnání uvádím dva zážehové motory o objemu 1,8l z dílny Ford:

1.8 Duratec HE – 92 kW (125 k)/6 000 ot., litrový výkon 70 k/l, 170 Nm/4500 ot., kompresní poměr 10,5, kombinovaná spotřeba paliva 7,9 l/100 km;

1.8 Duratec SCi – 96 kW (130 k)/6 000 ot., 73 k/l, 175 Nm/4250, kompresní poměr 11,3, kombinovaná spotřeba 7,2 l/100 km.

## 6 Budoucí rozvoj

Jako u naftových motorů se přímý vstřik paliva prosadil rychle i u zážehových motorů. Sice jej prosazuje ve větším měřítku pouze koncern Volkswagen, ale budoucnost přeje tomuto systému a jistě zcela vytlačí své předchůdce. První generace s sebou nepřinesla až tolik výhod, aby se automobilkám vyplatilo vysokých investic do vývoje a výroby. Hlavní nevýhodou byl nízký rozsah otáček, kdy je možné použít spalování chudé směsi, protože ve vysokých otáčkách se proudění vzduchu stane nekontrolovatelné a zamezí tak vrstvenému plnění. S příchodem piezoelektricky řízených vstřikovačů lze palivo vstříknout i ve více dávkách, tzv. předstříky. S rozvojem výrobních a konstrukčních technologií se u tohoto systému vstřikování paliva bude stále zlepšovat účinnost. Přijdou na řadu i alternativní paliva.

## 7 Závěr

Při psaní práce na téma Přímý vstřík benzínu jsem čerpal z odborných knih, publikací na internetu, ale také článků a diskusních fór veřejnosti. Zmínil jsem historii vývoje zážehových motorů a objasnil princip funkce, jak celého systému přímého vstřikování benzínu, tak i jednotlivých komponentů této palivové soustavy. V porovnání se staršími systémy jsem uvedl výhody, nevýhody i omezení tohoto systému vstřikování paliva.

Spíše než o revoluci se z mého hlediska jedná o další krok ve vývoji benzínových motorů. Systém přímého vstřikování benzínu totiž nepřináší žádnou výraznou změnu v automobilismu. Se snižující se zásobou neobnovitelných zdrojů energie a zvyšujícím se znečištěním životního prostředí tato „evoluce“ nekončí a lidskou snahou bude stále vyrábět ekologičtější, úspornější a výkonnější motory. Za revoluci snad jednou budeme považovat až automobily spalující zkapalněný vodík, označovaný často za „palivo budoucnosti.“



## Seznam použité literatury

- [1] Jan Z., Ždánský B. : Automobily 4: Příslušenství; Druhé vydání, Brno 2003
- [2] Ferenc B.: Spalovací motory; První vydání, Praha Computer press 2004
- [3] Vlk, F. : Příslušenství vozidlových motorů, Brno 2002
- [4] Vlk, F. : Vozidlové spalovací motory, Brno
- [5] *The german car blog*, [online]. Dostupné z:  
< [http://www.germancarblog.com/2005\\_11\\_01\\_archive.html](http://www.germancarblog.com/2005_11_01_archive.html) >
- [6] *Internal combustion engine*, [online]. Dostupné z:  
< [http://en.wikipedia.org/wiki/Internal\\_combustion\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion_engine) >
- [7] Broža P. , Litzman M. , *TÉMA: Přímý vstřík benzínu*, [online]. Dostupné z:  
< <http://www.autorevue.cz/default.aspx?article=5594> >
- [8] Dittrich L., *TÉMA: Přímý vstřík paliva - benzín vrací úder*, [online].  
Dostupné z:  
<<http://www.zavolantem.cz/clanky/primy-vstrik-paliva-benzin-vraci-uder> >
- [9] Savka J., *TÉMA: Nové motory N73*, [online]. Dostupné z:  
< <http://www.bmw-tuning.cz/?page=technika&clanek=nove-motory-N73> >
- [10] *GDI Fuel System*, [online]. Dostupné z:  
< [www.hptuners.com/forum/showthread.php?p=153715](http://www.hptuners.com/forum/showthread.php?p=153715) >